

Evaluation of AquaCrop model in predicting rice grain yield and biomass under water stress in different years

Hamid Mohammadi Dahrayi¹, Ebrahim Amiri^{2*}, Mojtaba Rezaei³, Jalal Behzadi⁴

¹ Ph.D Student, Department of Irrigation and Drainage, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

² Professor, Department of Water Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

³ Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Agriculture, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Rice is one of the most important cereals in providing food security and the main food of billions of people in the Asian continent and many other parts of the world. Drought is the most important factor limiting rice production in paddy fields, which affects all stages of rice growth and development. Research has shown that avoiding the conventional flood irrigation methods in rice cultivation and using alternative methods such as intermittent irrigation have a great effect on increasing water productivity and reducing its consumption. But in determining the most suitable alternative method of irrigation in each region, it should be noted that the effects of water shortage change with changes in the intensity, duration, and time of its application. Today, many Crop Growth Models (CGMs) have been designed to avoid the huge costs of conducting field research, speed up finding suitable solutions, and help to better understand and solve problems related to water movement in the soil and plant growth. Studies show that CGMs can consider the effect of different stresses, such as water stress, on dry matter production and grain yield during the growth period. One of the CGMs is the AquaCrop model developed by FAO. The presence of factors such as moderate to severe water stress causes a significant decrease in the simulation accuracy of the model, which is mentioned as one of the defects of the model. Most studies with the AquaCrop model have been limited to data collected in short periods. Therefore, this research aims to evaluate the efficiency and precision of the AquaCrop model in simulating rice grain yield and biomass under multiple water stresses and during different years.

Materials and Methods

In order to evaluate the precision of the model in predicting the grain yield and biomass of rice, using data collected from several research projects carried out in different years, the model were first calibrated and validated. The Hashemi variety was used in all these projects is the most common variety cultivated in Guilan province. All agricultural operations of planting, growing, and harvesting were carried out according to regional customs, and the amounts of chemical fertilizers, herbicides, and pesticides were based on the recommendations of experts in agriculture and herbal medicine from the rice research institute. For the present study, a total of 45 irrigation treatments were selected from the previous projects carried out in the lands of the Country Rice Research Institute, Lahijan, and Soumesara, of which 31 treatments were used for the calibration section and 14 treatments were used for model validation. The model was implemented for each irrigation treatment separately, and the grain yield and biomass values obtained from the simulation were analyzed with the measured values based on the statistical indicators used in this research.

Results and Discussion

Based on the results of calibration of the model, the range of observed grain yield was 2100 to 4870 with an average of 3765 kg.ha⁻¹. This is while the corresponding values simulated in the calibration conditions by the model were from 1749 to 4704 with an average of 3748 kg.ha⁻¹. The precision of the model is low at the low performance limit, but very accurate at the high and average performance limits. This phenomenon can be attributed to the estimation error of the model in the presence of environmental stresses such as water and fertilizer stress, which have also been mentioned in the studies of other researchers. Also, the values of RMSE and NRMSE for yield simulation were equal to 309.65 kg.ha⁻¹ and 8.22%, respectively, which indicates very good precision in model calibration. Also, RMSE and NRMSE values for biomass simulation in calibration conditions were equal to 596.31 kg.ha⁻¹ and 6.41%, respectively. The values of RMSE and NRMSE for the simulation of yield in the

validation conditions were equal to 168.42 kg.ha⁻¹ and 10.30%, which indicates good precision in model validation. Also, the values of RMSE and NRMSE for the simulation of biomass were equal to 554.71 kg.ha⁻¹ and 12.90%, which shows the good precision of the model in validation. Examining the results of the model in different water stresses showed that with the increase of water stress from permanent waterlogging to high stress through the addition of irrigation cycles, the amount of model error in yield simulation increases.

Conclusion

In general, the AquaCrop model has good precision in simulating the grain yield and biomass of the Hashemi rice variety, but the more severe the amount of water stress, the lower the precision of the model and the higher its error. This problem is attributed to the structure of the model and the mathematical equations used in it, as well as the measured data. However, the AquaCrop model has many advantages such as the need for less data, the ability to be used for a wide range of crops and the user-friendliness of the model and it is recommended to use the AquaCrop model in different irrigation managements, especially in conditions without severe water stress, where the model has very good precision. Nevertheless, due to the advantages, it is recommended that the AquaCrop model be used in different irrigation management strategies, especially under non-extreme water stress conditions, where it performs with very good precision.

Keywords: Validation, irrigation treatment, Hashemi variety, Crop Growth Model, calibration

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We consider it necessary to appreciate the spiritual support of the Rice Research Institute of Iran.

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement:

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Hamid Mohammadi Dahrayi: Conceptualization, performing software/statistical analysis, writing the first draft of the paper; **Ebrahim Amiri:** Editing and revising the article, controlling the results; **Mojtaba Rezaei:** consultation, revision of the text of the paper; **Jalal Behzadi:** revision of the text of the paper.

*Corresponding Author, E-mail: eamiri57@yahoo.com

Citation: Mohammadi Dahrayi, M., Amiri, E., Rezaei, M., & Behzadi, J. (2025). Evaluation of AquaCrop model in predicting rice grain yield and biomass under water stress in different years. *Water and Soil Management and Modeling*. 5(3), 37-53.

doi: 10.22098/mmws.2025.16123.1512

Received: 02 November 2024., Received in revised form: 11 January 2025, Accepted: 02 February 2025., Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 37-53.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)





ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت تنش‌های آبی در سال‌های مختلف

حمید محمدی دهرایی^۱، ابراهیم امیری^{۲*}، رضایی مجتبی^۳، جلال بهزادی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه آبیاری و زهکشی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

^۳ استادیار، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران

^۴ استادیار، گروه کشاورزی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر از مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت تنش‌های آبی متعدد و طی سال‌های مختلف استفاده شده تا صحت و کارایی مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. تعداد کل ۴۵ تیمار آبیاری از پروژه‌های پیشین انجام شده در اراضی موسسه تحقیقات برنج کشور و نیز دو پژوهش انجام شده در شهرستان‌های صومعه‌سرا و لاهیجان انتخاب شدند که از این تعداد ۳۱ تیمار برای بخش واسنجی و ۱۴ تیمار برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. تنش‌های آبی اعمال شده در چهار پژوهش شامل دوره‌های آبیاری ۴، ۵، ۸ و ۱۲ روزه و در یک پژوهش شامل تنش در مراحل رویشی و زایشی گیاه بود. مدل برای هر تیمار آبیاری به‌طور جداگانه اجرا و مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص‌های آماری جذر مجموع مربعات خطا ($RMSE$) و جذر مجموع مربعات خطا نرمال شده ($NRMSE$) و نیز ضریب رگرسیونی خطی (R^2) مورد تحلیل قرار گرفت. مقادیر $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 در شرایط واسنجی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب برابر $۳۰۹/۶۵$ و $۵۹۶/۳۱$ کیلوگرم در هکتار، $۸/۲۲$ و $۶/۴۱$ درصد و $۰/۸۰$ و $۰/۷۷$ بود که بیانگر صحت بسیار خوب مدل در شرایط واسنجی است. همچنین، مقادیر $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 در شرایط اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده به‌ترتیب برابر $۱۶۸/۴۲$ و $۵۵۴/۷۱$ کیلوگرم در هکتار، $۱۰/۳۰$ و $۱۲/۹۰$ درصد و $۰/۸۵$ و $۰/۷۰$ بود. دامنه تغییرات خطای مدل برای حالت بدون تنش از $-۸/۶۵$ تا $۹/۸۱$ درصد، برای حالت با تنش متوسط از $-۱۰/۵۶$ تا $۱۵/۲۹$ درصد، و برای حالت با تنش زیاد از $-۱۵/۰۰$ تا $۱۲/۳۴$ درصد متغیر بود. این بازه‌های خطا نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی از غرقاب دائم به تنش زیاد از طریق اعمال دور آبیاری، میزان خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل در حالت کلی از صحت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده برخوردار است، اما هرچه میزان تنش آبی اعمال شده افزایش می‌یابد، از صحت مدل کاسته می‌شود، به گونه‌ای که مدل بالاترین صحت را در شبیه‌سازی مقادیر مربوط به شرایط بدون تنش آبی از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، تیمار آبیاری، رقم هاشمی، مدل رشد گیاهی، واسنجی.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: eamiri57@yahoo.com

استناد: محمدی دهرایی، حمید، امیری، ابراهیم، رضایی، مجتبی، و بهزادی، جلال (۱۴۰۴). ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت تنش‌های آبی در سال‌های مختلف. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۳۷-۵۳.

doi: 10.22098/mmws.2025.16123.1512

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۷ تا ۵۳.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

حساسیت بالای کشاورزی نسبت به تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌ها و منابع آب، لزوم استفاده از روش‌های کارآمد آبیاری، و اجرای شیوه‌های کشاورزی پایدار را در راستای رسیدن به امنیت غذایی در سطح کشور، ضروری می‌سازد. برنج یکی از مهم‌ترین غلات در تأمین امنیت غذایی (Bandumula, 2018) و غذای اصلی میلیارد‌ها انسان در قاره آسیا و بسیاری از نقاط دیگر جهان است (Arivelarasan et al., 2023). تولید برنج در ایران با سطح زیر کشت ۵۲۰ هزار هکتار، حدود ۲/۱ میلیون تن تخمین زده شده که جوابگوی نیاز داخلی نبوده و کمبود آن از طریق واردات جبران می‌شود (FAO, 2023). استان گیلان با بیش از ۲۳۰ هزار هکتار بیش‌ترین سطح زیر کشت برنج را در بین استان‌های کشور در اختیار دارد (Ministry of Agriculture Jihad, 2023). با توجه به اینکه بخش بزرگی از شالیزارهای استان گیلان به شبکه آبیاری سد سپیدرود وابسته هستند و با توجه به کاهش شدید حجم آب ورودی به این سد، مدیریت کلان آبیاری در استان گیلان بر استفاده حداکثری از منابع آبی موجود در سطح استان تأکید دارد (Yazdani et al., 2023). خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید برنج در اراضی شالیزاری است که بر تمامی مراحل رشد و نمو برنج اثر دارد (Koochaki et al., 2013). پیش‌بینی می‌شود که شدت و دفعات تنش‌های خشکی در سال‌های پیش رو بیش‌تر نیز شود (Kuzma et al., 2023) که این مسئله ضرورت تحول در نظام‌های تولید پایدار مواد غذایی برای پاسخ‌گویی به نیاز جمعیت رو به رشد جهان در شرایط تغییر اقلیم جهانی را مشخص می‌سازد (Matthews et al., 2013). به عبارت دیگر با توجه به کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی و کاهش سهم آب بخش کشاورزی، بهبود بهره‌وری آب خصوصاً در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، ضروری به نظر می‌رسد.

روش مرسوم آبیاری در کشت برنج، غرقاب دائم است که به انتشار گازهای گلخانه‌ای، پایین آمدن راندمان جذب و مصرف مواد مغذی و بهره‌وری پایین آب منجر می‌شود (Richards and Ole, 2014). روش‌های جایگزین نظیر آبیاری تناوبی از سوی پژوهش‌گران به عنوان روش‌هایی کم‌مصرف، اقتصادی و سازگار با محیط زیست در کشت برنج معرفی شده‌اند (Richards and Ole, 2014; Ishfaq et al., 2020). اما در تعیین مناسب‌ترین روش جایگزین آبیاری در هر منطقه باید توجه داشت که اثرات کمبود آب با تغییرات شدت، مدت و زمان کاربرد آن تغییر می‌کند (Alizadeh et al., 2011). بنابراین آگاهی دقیق از روابط پیچیده بین مقدار مصرف آب و عملکرد محصول برای نیل به این هدف ضروری است. به همین منظور امروزه مدل‌های متعدد شبیه‌ساز رشد گیاهی مانند (WOFOST (Van Diepen et al., 1989)،

DSSAT (Oryza, 2000; Bouman et al., 2001; Dias et al., 2016) برای جلوگیری از هزینه‌های هنگفت انجام پژوهش‌های صحرایی، سرعت بخشیدن به یافتن راهکارهای مناسب و کمک به درک بهتر و حل مسائل مربوط به حرکت آب در خاک و رشد گیاهان طراحی شده است (Jin et al., 2023). مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌های رشد گیاهی قادرند اثر تنش‌های مختلف مانند تنش آبی بر تولید ماده خشک و عملکرد دانه گیاه را در طول دوره رشد در نظر بگیرند (Takács et al., 2021; Zhou et al., 2024).

یکی از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهان مدل AquaCrop است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی و به منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف بسط داده شده است (Steduto et al., 2009). اساس کار این مدل شبیه‌سازی پاسخ عملکرد محصولات گیاهی به آب است و عملکرد دانه را بر اساس تعرق روزانه پیش‌بینی می‌کند (Jin et al., 2018; FAO, 2020). مدل AquaCrop علی‌رغم ساده‌تر بودن نسبت به سایر مدل‌های گیاهی، به دلیل نیاز به داده‌های کم‌تر (Steduto et al., 2009)، کاربردوست بودن و برخورداری از صحت قابل قبول، در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان متعددی استفاده شده است (Ebrahimi Pak et al., 2018; Zhai et al., 2019; Barzikar et al., 2020). همچنین، از مدل AquaCrop در ارزیابی رژیم‌های مختلف آبیاری (Ran et al., 2018; Mostafa et al., 2023; Jorge et al., 2023)، بررسی شرایط مصرف کود (Dercas et al., 2022; Wang et al., 2024)، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصول در فصول و مکان‌های مختلف (Mibulo and Kiggundu, 2018; Gurgel et al., 2021)، توسعه ابزار تصمیم‌گیری برای انجام فعالیت‌های مزرعه (Cusicanqui et al., 2013) و نیز آنالیز بازده اقتصادی (Margarita and Elías, 2012) استفاده شده است. همچنین، از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده محصولات زراعی مختلف نظیر گندم (Andarzian et al., 2011)، ذرت (Mibulo and Kiggundu, 2018)، سویا (Stricevic et al., 2014)، آفتاب‌گردان (Saadati et al., 2011; Maniruzzaman et al., 2015; Zhai et al., 2019) و بسیاری از محصولات دیگر (Razzaghi et al., 2017; Puma-Cahua et al., 2023) تحت شرایط اقلیمی و زراعی متنوع استفاده شده است که صحت مدل در مورد محصولات مختلف با یکدیگر تفاوت داشت (Dehghan Moroozeh et al., 2023).

مطالعه‌ای که در آن کارایی مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های اخذ شده از تیمارهای متعدد تنش آبی در شالیزارها طی سال‌های مختلف مورد بررسی قرار بگیرد، انجام نشده است. لذا هدف این پژوهش بررسی کارایی و ارزیابی صحت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت تنش‌های آبی متعدد و طی سال‌های مختلف است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop به‌منظور ارزیابی صحت آن در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج از داده‌های برداشت شده از چند پروژه تحقیقاتی انجام شده طی سال‌های مختلف در موسسه تحقیقات برنج کشور واقع در رشت (Rezaei, 2008; Rezaei et al. 2012; Rezaei and Nahvi, 2003) و دو سایت در صومعه‌سرا و لاهیجان (که داده‌های این دو سایت در پژوهش حاضر برای اولین بار به‌کار گرفته شد) استفاده گردید. رقم مورد استفاده در تمام این پروژه‌ها رقم هاشمی بود که رایج‌ترین رقم کشت شده در استان گیلان است. تمام عملیات زراعی کاشت، داشت و برداشت طبق عرف منطقه و مقادیر کودهای شیمیایی، علف‌کش و آفت‌کش‌ها براساس توصیه‌های متخصصین زراعت و گیاه‌پزشکی موسسه تحقیقات برنج کشور انجام شد. تیمارهای آبیاری طبق روال معمول بر اساس دور مورد نظر و تا ارتفاع ۵۰ میلی‌متر اعمال و مقادیر حجم آب توسط کنتور اندازه‌گیری می‌شد. در زمان رسیدگی، مقدار عملکرد دانه و زیست‌توده با برداشت ۵ مترمربع از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه‌ای اندازه‌گیری شد. نتایج مربوط به تجزیه شیمیایی نمونه‌های خاک و آب به‌دست آمده از سایت‌های تحقیقاتی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. داده‌های هواشناسی شامل داده‌های روزانه حداقل و حداکثر دما، مقدار بارندگی، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی از ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت با مختصات جغرافیایی ۳۹° طول شرقی و ۱۲° ۳۷' عرض شمالی و ارتفاع ۲۴/۹ متر از سطح دریا اخذ شد (جدول ۳).

وجود عواملی نظیر تنش‌های متوسط تا شدید آبی سبب کاهش قابل توجه صحت شبیه‌سازی مدل AquaCrop می‌شود که به‌عنوان یکی از نقایص مدل ذکر شده است (Heng et al., 2017; Ahmadi et al., 2015; Battisti et al., 2009).

در مطالعه‌ای (Sandhu and Irmak, 2019) بیان داشتند که عملکرد مدل AquaCrop به‌خصوص در شبیه‌سازی زیست‌توده و محتوای آب خاک، در سال‌های خشک با تبخیر بالا و سال‌های مرطوب با بارندگی زیاد دارای صحت بسیار پایین‌تری نسبت به شرایط نرمال است. همچنین، Katerji et al. (2013) نشان دادند که تنش آبی بر شبیه‌سازی پوشش گیاهی توسط مدل AquaCrop نیز اثرگذار بوده و سبب کاهش صحت آن می‌شود و مرحله توسعه گیاهی نیز بر صحت پیش‌بینی مدل اثرگذار است. آن‌ها بیان داشتند که مدل تبخیر و تعرق را به‌هنگام خشکی، بیش‌تر از مقدار واقعی و پس از انجام آبیاری، کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. (Sandhu and Irmak, 2019) نشان دادند که مدل پوشش گیاهی را در اواسط فصل زراعی به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند، اما پوشش گیاهی را در مرحله توسعه و پیری، کم‌تر یا بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. این مورد می‌تواند به این دلیل باشد که پیری پوشش گیاهی تحت تنش آبی شدید، تشدید و رشد ریشه نیز محدود شده و از استخراج و جذب آب بیش‌تر از خاک جلوگیری شود (Steduto et al., 2009). همچنین، تنش آبی با توجه به زمان، شدت و نوع گیاه می‌تواند شاخص برداشت و در نهایت عملکرد را افزایش یا کاهش دهد (Mondal et al., 2015). در گزارش Hsiao et al. (2009) مدل AquaCrop میزان رطوبت خاک را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرد که ممکن است یکی از دلایل آن، خطاهای اندازه‌گیری باشد. برای مثال قرائت کاوشگر نوترونی چند روز پس از آبیاری، سبب می‌شود تا مقادیر بیشینه رطوبت خاک ثبت نشود. همچنین، (Farahani et al., 2009; Hussein et al., 2011) بیان کردند که مدل AquaCrop در شرایط کم آبیاری، تمایل دارد میزان آب خاک را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کند.

بیش‌تر مطالعات صورت گرفته با مدل AquaCrop در دوره‌های کوتاه یک یا دوساله انجام شده است و از این‌رو،

جدول ۱- دامنه نتایج تجزیه خاک تا عمق زراعی در سایت‌های مطالعاتی

Table 1- Range of the soil analysis results to crop depth at the study sites

Saturation percentage	EC (dS.m ⁻¹)	Total nitrogen (%)	Absorbable phosphorus (mg.L ⁻¹)	Absorbable potassium (mg.L ⁻¹)	Soil texture
65-75	0.56-1.05	0.130-0.189	10.60-17.80	280-315	Si-Cl to Si-Cl-Lo

جدول ۲- دامنه نتایج تجزیه آب آبیاری در سایت های مطالعاتی

Table 2- Range of the irrigation water analysis results of the study sites

EC(dS.m ⁻¹)	pH	Carbonate	Bicarbonate	Cl	So ₄	Ca	Mg	Na	SAR
0.85-1.15	7.30-7.67	1.20-1.30	3.33-4.70	4.10-4.60	0.39-0.42	3.90-4.40	1.70-2.90	5.10-7.20	3.01-4.40

غلظت عناصر بر حسب meq.L⁻¹ است.

جدول ۳- میانگین داده های هواشناسی بلندمدت در سایت های مطالعاتی (۱۳۸۰-۱۴۰۰)

Table 3- Average long-term meteorological data of the study sites (2001-2021)

average hours of sunshine	average maximum relative humidity (%)	average minimum relative humidity (%)	total precipitation (mm)	average maximum temperature (°C)	average minimum temperature (°C)
4.54	92.09	68.33	1322.60	20.80	11.60

$$K_{CTr} = K_{CTr,x} CC^* \quad (۳)$$

که در آن CC^* پوشش گیاهی تعدیل شده برای اثرات ریز فرارفتی^۱، و $K_{CTr,x}$ ضریب گیاهی برای حداکثر تعرق محصول است که با توجه به خصوصیات متمایز محصولی با پوشش گیاهی کامل از گیاه مرجع متمایز می شود. به طور معمول، $K_{CTr,x}$ بین ۱/۰۵ و ۱/۲۰ برای اکثر محصولات متغیر است (Li et al., 2019).

ب- محاسبه زیست توده کل: زیست توده کل (B) توسط مدل با استفاده از بهره وری آب نرمال شده (WP) و تعرق تجمعی محصول در طول فصل رشد به شرح زیر محاسبه می شود (رابطه ۴):

$$B = WP * \sum T_r \quad (۴)$$

ت- پیش بینی عملکرد: مدل با استفاده از پارامتر زیست توده کل و شاخص برداشت (HI)، عملکرد (Y) را با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می کند (Mbanga et al., 2019):

$$Y = HI * B \quad (۵)$$

AquaCrop با تبدیل تعرق شبیه سازی شده روزانه محصول به زیست توده معادل، مقدار عملکرد را ارائه می کند، که سپس با استفاده از مقادیر شاخص برداشت به عملکرد تبدیل می شود (Roos et al., 2021). برای واسنجی مدل AquaCrop از استاندارد تدوین شده برای خود مدل توسط سازمان FAO بهره برده شد (Steduto et al., 2009) که به طور مشخص سه مرحله فنولوژیکی، عملکرد کل و زیست توده، هدف واسنجی بود.

۳-۲- تیمارهای آبیاری

مشخصات منبع تیمارهای آبیاری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند در جدول ۴ ارائه شده است. تیمارها شامل آبیاری غرقاب دائم، آبیاری با دوره های ۵، ۸ و ۱۲ روزه، و نیز اعمال تنش

۲-۲- مدل AquaCrop

مدل AquaCrop دو مدل Budget (Raes, 2002) و CROPWAT (Smith, 1992) را با یکدیگر ترکیب کرده و بر اساس معادله Doorenbos and Kassam (1979) نوشته شده است. این مدل دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر است و با چهار جزء اساسی سروکار دارد که عبارتند از فرایندهای فیزیکی و هیدرولیک شامل خصوصیات پروفیل خاک و آب زیرزمینی، پارامترهای فیزیولوژیکی و بهره وری محصول فنولوژی، عمق ریشه، زیست توده، رشد، توسعه و عملکرد، اتمسفر شامل دما، بارش، تبخیر و تعرق و غلظت دی اکسید کربن و مدیریت مزرعه شامل تکنیک های آبیاری و کاشت (Raes et al., 2009). مدل AquaCrop مراحل توسعه محصول و فرآیندهای تولید را به صورت روزانه در چهار مرحله شبیه سازی می کند که عبارتند از:

الف- مرحله توسعه تاج گیاهی: مدل در این مرحله رشد شاخ و برگ را با استفاده از پوشش گیاهی نشان می دهد، که نشان دهنده نسبت سطح خاک پوشیده شده توسط تاج گیاهی است (رابطه ۱):

$$CC = \frac{\text{سطح خاک پوشیده شده توسط تاج گیاهی}}{\text{واحد سطح زمین}} \quad (۱)$$

که در این رابطه CC، پوشش گیاهی است.

ب- مرحله تعرق محصول: مدل تعرق گیاه را با ضرب تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) در ضریب تعرق گیاهی (K_{CTr}) و ضریب تنش آبی (K_s) محاسبه می کند (Li et al., 2019) که در رابطه ۲ نشان داده شده است:

$$T_r = K_s K_{CTr} ET_0 \quad (۲)$$

این ضریب هنگامی که تنش آبی باعث بسته شدن روزنه نشود معادل یک است. ضریب تعرق محصول (K_{CTr}) متناسب با پوشش گیاهی است (رابطه ۳):

¹ Micro-advective effects

برای بخش واسنجی و ۱۴ تیمار برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مدل برای هر تیمار آبیاری به‌طور جداگانه اجرا و مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش مورد تحلیل قرار گرفت.

در فاز رویشی و زایشی بوده است. در آبیاری با غرقاب دائم همواره ارتفاع آب به اندازه ۵ سانتی‌متر روی سطح زمین حفظ می‌شد. برای پژوهش حاضر تعداد کل ۴۵ تیمار آبیاری از پروژه‌های پیشین انجام شده در اراضی موسسه تحقیقات برنج کشور، لاهیجان و صومعه‌سرا انتخاب شدند که از این تعداد ۳۱ تیمار

جدول ۴- مشخصات تیمارهای مورد استفاده برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در سال‌های مختلف

Table 4- The characteristics of the treatments used for the model calibration and validation in different years

year	water treatment	location and reference
2004-2006	permanent flooding and 5 and 8-day irrigation intervals	Rice Research Institute of Iran (Rezaei, 2008)
2001-2002	permanent flooding and 5 and 8-day irrigation intervals	Rice Research Institute of Iran (Rezaei and Nahvi, 2003)
2021-2023	permanent flooding and stress during the vegetative and reproductive periods	Someh-Sara (conducted in this research)
2017-2019	permanent flooding and 4, 8, and 12 day irrigation intervals	Rice Research Institute of Iran (Rezaei et al, 2023)
2021-2023	permanent flooding and 5 and 8-day irrigation intervals	Lahijan (conducted in this research)

است. چنانچه NRMSE کم‌تر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده حالت عالی شبیه‌سازی و بین ۲۰-۱۰ حالت خوب، بین ۳۰-۲۰ حالت متوسط و بالای ۳۰ حالت ضعیف شبیه‌سازی است (Rinaldi et al, 2003). بازه تغییرات R^2 نیز بین صفر تا یک است. اگر مقدار R^2 به یک نزدیک باشد، مدل داده‌ها را خوب برازش کرده است، در حالی که اگر همبستگی پایین (نزدیک به صفر) باشد، مدل برازش خوبی از داده‌ها ارائه نداده است.

۳- نتایج و بحث

برخی از ضرایب گیاهی پیش‌فرض برای گیاه برنج در مدل AquaCrop در نظر گرفته شده‌اند که در جدول ۵ بیان شده است. همچنین، ضرایبی که در واسنجی تنظیم شد شامل ضریب رشد تاج پوشش (۱۳/۱ درصد در روز)، ضریب کاهش تاج پوشش (۱۱/۸ درصد در روز)، بهره‌وری آب نرمال شده (۲۰ گرم بر مترمربع)، حداکثر پوشش تاج پوشش (۹۵ درصد)، زمان کاهش تاج پوشش (۲۵ روز)، شاخص برداشت (۵۷ درصد)، آستانه پایین و بالای منحنی ضریب تنش خشکی برای گسترش تاج پوشش گیاه (به ترتیب ۰/۸ و ۰/۵) و ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاج پوشش گیاه (صفر) بود. جدول ۵ نشان‌دهنده واسنجی مؤلفه‌های گیاهی مدل AquaCrop برای برنج رقم هاشمی است.

۴-۲- شاخص‌های آماری ارزیابی نتایج مدل

برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد برنج، از شاخص‌های آماری جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) و جذر مجموع مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و نیز ضریب رگرسیونی خطی (R^2) مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر شبیه‌سازی شده استفاده شد. برای تعیین بیش‌برآوردها و کم‌برآوردها نیز از معیار خطای نسبی (R_r) استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \quad (6)$$

$$NRMSE = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n}{\bar{O}^2} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$R_r = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \quad (9)$$

که در این رابطه‌ها: P_i مقدار شبیه‌سازی شده مدل، O_i مقدار اندازه‌گیری شده واقعی، n تعداد اندازه‌گیری واقعی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است.

دامنه مقادیر حاصل از RMSE از صفر تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و نیز واحد اندازه‌گیری یکسانی با متغیر وابسته یا هدف دارد. پایین بودن مقدار RMSE نشان‌دهنده این است که مدل به‌خوبی بر داده‌ها برازش شده و پیش‌بینی‌ها دارای صحت بالایی

جدول ۵- واسنجی مؤلفه های گیاهی مدل برای برنج رقم هاشمی

Table 5- Calibration of model plant components for Hashemi rice variety

parameters	unit	default	calibrated
base temperature	°C	8	
cut off temperature	°C	30	
canopy growth coefficient (CGC)	%/روز		13.1
canopy decline coefficient (CDC)	%/روز		11.8
water productivity (WP)	g/m ²		20
maximum canopy cover	%		95
canopy decline	روز		25
harvest Index (HI)	%		57
crop coefficient when canopy is complete ($K_{cTr,x}$)	(-)	1.15	
upper threshold for canopy expansion	(-)		0.5
lower threshold for canopy expansion	(-)		0.8
leaf expansion stress coefficient curve shape	(-)		0.0
water stress coefficient for stomatal closure	(-)	0.7	
shape factor for water stress coefficient for stomatal closure	(-)	3.0	
soil water stress coefficient for canopy expansion	(-)	0.6	
shape factor for water stress coefficient for canopy expansion	(-)	3.0	

۹۳۰۶ کیلوگرم در هکتار بوده است. هم چنین، مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 برای شبیه سازی زیست توده برابر ۵۹۶/۳۱ کیلوگرم در هکتار، ۶/۴۱ درصد و ۰/۷۷ بوده است که بیانگر صحت بسیار خوب واسنجی مدل است.

جدول ۷ و شکل ۲ نشان دهنده مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه و زیست توده در شرایط اعتبارسنجی مدل است. بر اساس این جدول دامنه عملکرد دانه مشاهداتی ۲۶۳۰ تا ۴۶۵۴ با میانگین ۳۸۵۷ کیلوگرم در هکتار بود. این در حالی است که مقادیر متناظر شبیه سازی شده توسط مدل برابر ۲۶۰۴ تا ۴۶۶۷ با میانگین ۳۹۴۵/۹ کیلوگرم در هکتار بوده است. هم چنین، مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 برای شبیه سازی عملکرد برابر ۱۶۸/۴۲ کیلوگرم در هکتار، ۱۰/۳۰ درصد و ۰/۸۵ بوده است که بیانگر صحت خوب در اعتبارسنجی مدل است. دامنه زیست توده مشاهداتی نیز بین ۸۰۲۲ تا ۱۱۳۲۳ با میانگین ۹۴۹۶ کیلوگرم در هکتار بود. این در حالی است که مقادیر متناظر شبیه سازی شده توسط مدل برای این بازه برابر ۷۲۸۴ تا ۱۰۳۶۰ با میانگین ۱۰۱۱۸ کیلوگرم در هکتار بوده است. هم چنین، مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 برای شبیه سازی زیست توده برابر ۵۵۴/۷۱ کیلوگرم در هکتار، ۱۲/۹۰ درصد و ۰/۷۰ بوده است که نشان دهنده صحت خوب مدل در اعتبارسنجی بوده است. (Paredes et al. (2014 مقدار NRMSE را برای شبیه سازی عملکرد ذرت با مدل AquaCrop، ۹ درصد بیان کردند. (Maniruzzaman et al. (2015 پیش بینی مدل AquaCrop در واسنجی و اعتبارسنجی برای عملکرد دانه برنج به ترتیب از ۵/۵۵ تا ۷/۷۰ درصد و از ۸/۲۲ تا ۱۱/۵۴ درصد و برای زیست توده به ترتیب از ۲/۶۲ تا ۵/۱۹ درصد

برای شبیه سازی عملکرد دانه و زیست توده در برنج با تغییر ضرایبی که به صورت پیش فرض در مدل AquaCrop قرار داده شده است و بر اساس کمترین خطا بین نتایج خروجی مدل و مقادیر مشاهداتی، مؤلفه های گیاهی ارقام برنج به دست آمد. به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل به ترتیب از تعداد ۳۱ و ۱۴ تیمار آبیاری طی سال های مختلف استفاده شد (جدول ۵).

جدول ۶ و شکل ۱ نشان دهنده مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه و زیست توده در شرایط واسنجی با مدل AquaCrop و نیز میزان خطای نسبی شبیه سازی در هر تیمار است. بر اساس این جدول دامنه عملکرد دانه مشاهداتی برابر ۲۱۰۰ تا ۴۸۷۰ با میانگین ۳۷۶۵ کیلوگرم در هکتار بود. این در حالی است که مقادیر متناظر شبیه سازی شده در شرایط واسنجی توسط مدل برابر ۱۷۴۹ تا ۴۷۰۴ با میانگین ۳۷۴۸ کیلوگرم در هکتار بوده است. صحت مدل در حد پایین عملکرد کم، ولی در حد بالا و میانگینی عملکرد، صحت بسیار خوبی داشته است. این پدیده را می توان به خطای برآورد مدل در شرایط وجود تنش های محیطی مانند تنش آب و کود نسبت داد که در مطالعات سایر پژوهشگران نیز به آن اشاره شده است (Amiri et al., 2011). هم چنین، مقادیر RMSE، NRMSE و R^2 برای شبیه سازی عملکرد برابر ۳۰۹/۶۵ کیلوگرم در هکتار، ۸/۲۲ درصد و ۰/۸۰ بوده است که بیانگر صحت بسیار خوب در واسنجی مدل است. صحت نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای زیست توده بر اساس داده های مشاهداتی نیز نشان می دهد دامنه تغییرات زیست توده مشاهداتی برابر با ۷۱۰۴ تا ۱۱۳۲۳ با میانگین ۹۲۲۳ کیلوگرم در هکتار بود. این در حالی است که مقادیر متناظر شبیه سازی شده توسط مدل برابر ۶۹۰۰ تا ۱۱۱۷۳ با میانگین

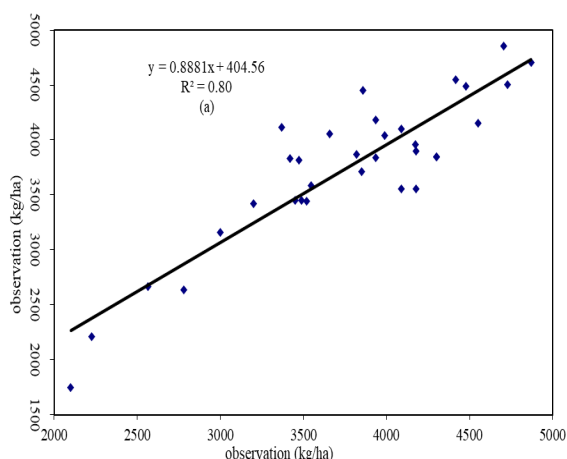
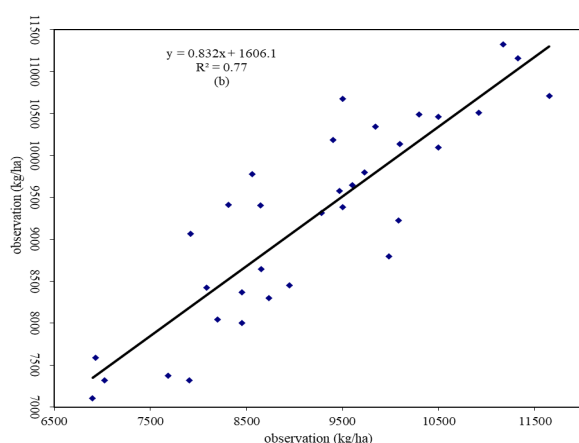
قادر است عملکرد دانه و زیست‌توده گندم زمستانه را تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری با حداکثر خطای ۱۲/۳۵ و ۱۴ درصد

و از ۷/۹۵ تا ۱۱/۱۵ درصد متغیر بود، که عملکرد خوب مدل را نشان داد. (Du et al. (2011 نشان دادند که مدل AquaCrop

جدول ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه و زیست‌توده ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) در واسنجی مدل

Table 6- Simulated and observed values of grain yield and biomass ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) for model calibration

water treatment	yield			biomass		
	observation	simulation	relative error (%)	observation	simulation	relative error (%)
1	4871	4704	-3.43	11157	11326	1.49
2	4730	4501	-4.84	10342	9841	-5.09
3	4175	3955	-5.3	9797	9730	-0.69
4	4090	4099	0.24	9312	9280	0.34
5	4089	3557	-13.02	10491	10300	-1.85
6	4417	4549	2.99	10712	11650	8.05
7	4300	3846	-10.56	10462	10500	0.36
8	4300	3846	-10.56	10185	9400	-8.35
9	4180	3553	-15.00	9382	9500	1.24
10	4179	3902	-6.63	9647	9600	-0.49
11	3548	3587	1.11	7104	6900	-2.96
12	3521	3445	-2.15	8367	8451	1.00
13	3490	3452	-1.09	10677	9501	-12.38
14	3988	4043	1.38	8643	8656	0.15
15	3937	3837	-2.53	9069	7921	-14.49
16	3935	4180	6.24	9576	9471	-1.11
17	3858	4448	15.29	8451	8950	5.57
18	3850	3714	-3.53	8041	8197	1.91
19	3820	3870	1.31	9775	8562	-14.17
20	3657	4059	11.96	7322	7025.5	-4.22
21	3200	3418	6.81	9403	8648	-8.73
22	3000	3163	5.43	7999	8454	5.38
23	3475	3816	9.81	8302	8732	4.92
24	3450	3452	0.06	11323	11173	-1.34
25	3420	3829	11.96	10096	10497	3.82
26	2780	2638	-5.11	8798	9982	11.86
27	2565	2664	3.84	10135	10095	-0.40
28	2226	2211	-0.66	9224	10081	8.50
29	4704	4857	3.25	8424	8085	-4.19
30	4550	4156	-8.66	7589	6928	-9.54
31	4477	4488	0.24	7373	7683	4.03
RMSE (kg/ha)		309.65			596.31	
NRMSE (%)		8.22			6.41	
R^2		0.80			0.77	



شکل ۱- (الف) واسنجی مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهداتی ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); (ب) واسنجی مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهداتی ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Figure 1- (a) Calibration of the simulated yield values against observed values ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); (b) Calibration of the simulated biomass values against observed values ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

برخی از پژوهشگران گزارش کرده اند که اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه سازی شده تحت شرایط تنش شدید آبی در مقایسه با تیمارهای با آبیاری خوب برای محصولات مختلف با مدل AquaCrop، بسیار بیش تر است (Heng et al., 2009; Araya et al., 2010; Iqbal et al., 2014).

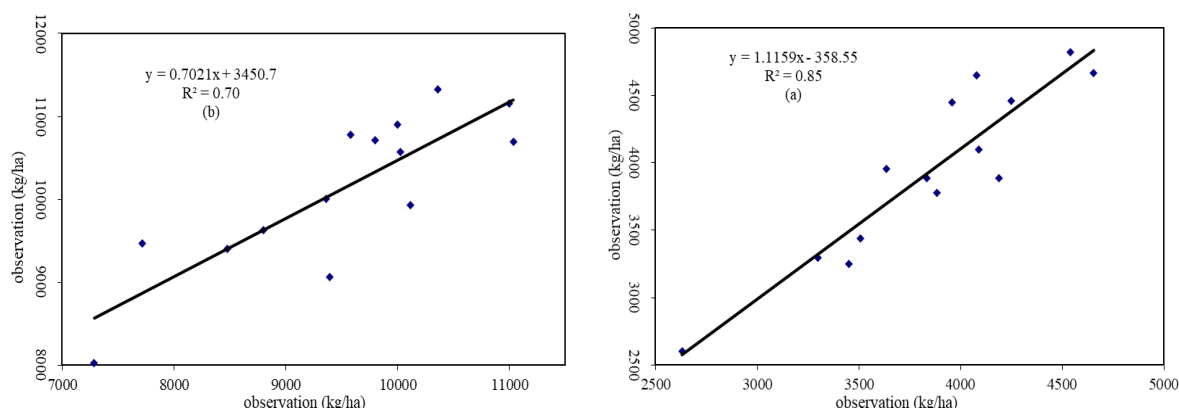
در مطالعه ای (Hsiao et al., 2009) به محدودیت های مدل AquaCrop در شبیه سازی سرعت گرفتن دوره پیری پوشش گیاهی ناشی از تنش آبی اشاره کردند و گزارش دادند که میزان RMSE برای ذرت از محدوده ۴/۸۲ تا ۱۳/۶۳ درصد تحت شرایط بدون تنش و با تنش آبی در کالیفرنیا متغیر است. به طور کلی یکی از دلایل کاهش صحت مدل در شبیه سازی تحت تنش آبی می تواند این باشد که کمبود آب در منطقه ریشه سرعت گسترش پوشش گیاهی را کاهش می دهد، هدایت روزنه ای را کاهش می دهد و باعث پیری زودرس پوشش گیاهی می شود (Steduto et al., 2009). همچنین، (Elsadek et al., 2023) بیان کردند که نتایج شبیه سازی AquaCrop برای کشت برنج در دو فصل زراعی مختلف، همبستگی خوبی بین عملکرد مشاهده شده و شبیه سازی شده برنج را نشان داد ($R^2=0.99$) برای فصل زراعی ۲۰۱۹ و $R^2=0.98$ برای فصل زراعی ۲۰۲۰.

شبیه سازی کند که صحت خوبی بشمار می رود. Nikolaus. (2013) از مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد دانه و زیست توده برنج استفاده کرد و مقادیر ME برای زیست توده و عملکرد در تیمارهای مختلف را به ترتیب از ۰/۸۸ تا ۰/۹۵ و ۰/۸۷ تا ۰/۹۶ تن در هکتار به دست آورده و بیان نمودند مقدار زیست توده برای تیمارهای غرقاب با کوددهی مناسب، دارای بیش برآورد جزئی تا ۱۰ درصد است. (Shrestha et al., 2013) RMSE (تن در هکتار)، R^2 و ضریب نش-ساتکلیف را در شبیه سازی عملکرد دانه برنج با مدل AquaCrop، به ترتیب ۰/۲۰، ۰/۹۴ و ۰/۹۲ گزارش کردند. آن ها بیان کردند که برداشت دستی ناقص و باقی ماندن ناخواسته بخشی از زیست توده روی زمین، سبب کاهش میزان زیست توده مشاهداتی شده است. این مسئله نشان می دهد که جمع آوری ناقص داده های میدانی می تواند به بیش برآورد مقادیر عملکرد یا زیست توده منجر شود. (Saadati et al., 2011) گزارش دادند که خطاهای اعتبارسنجی در فصل خشک برای شبیه سازی زیست توده و عملکرد برنج توسط مدل AquaCrop به ترتیب از ۱۰- تا ۹/۴۲ درصد و از ۱۹- تا ۰/۲۰ درصد متغیر بود. همچنین، میزان RMSE در شبیه سازی عملکرد دانه در تمامی تیمارهای آبیاری ۰/۷ تن در هکتار بود.

جدول ۷- مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه و زیست توده (kg.ha^{-1}) در اعتبارسنجی مدل

Table 7- Simulated and observed values of grain yield and biomass (kg.ha^{-1}) for model validation

water treatment	yield			biomass		
	observation	simulation	relative error (%)	observation	simulation	relative error (%)
۱	4654	4667	0.28	11157	11000	-1.43
۲	4541	4820	6.12	10899	10000	-8.99
۳	4250	4459	4.92	9633	8800	-9.47
۴	4190	3886	-7.26	10712	9800	-9.31
۵	4090	4100	0.24	10574	10027	-5.46
۶	4080	4647	13.90	8022	7284	-10.12
۷	3957	4446	12.34	9929	10113	1.98
۸	3882	3779	-2.66	10008	9362	-6.89
۹	3833	3888	1.41	9464	7717	-22.64
۱۰	3635	3957	8.86	9403	8476	-10.94
۱۱	3507	3441	-1.88	10695	11036	3.09
۱۲	3450	3251	-5.77	11323	10360	-9.30
۱۳	3300	3297	-0.09	10777	9579	-12.51
۱۴	2630	2604	-0.99	9059	9392	3.55
RMSE (kg/ha)		168.42			554.71	
NRMSE (%)		10.30			12.90	
R^2		0.85			0.70	



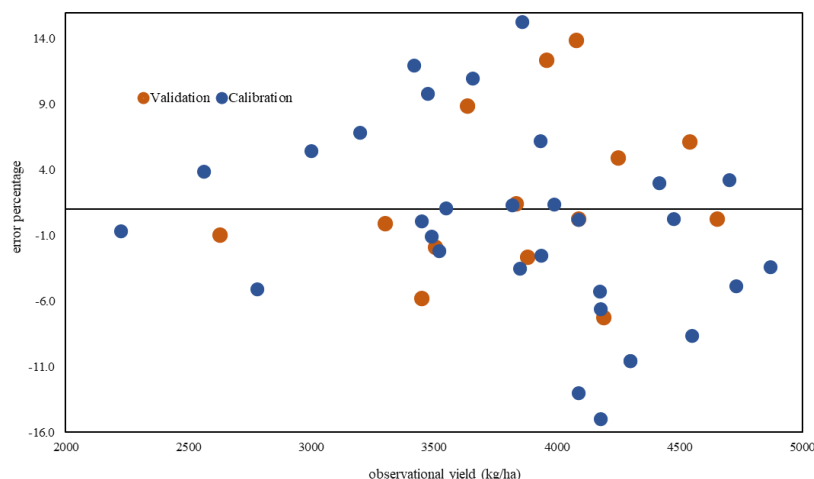
شکل ۲- (الف) اعتبارسنجی مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهداتی ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); (ب) اعتبارسنجی مقادیر زیست‌توده شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهداتی ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Figure 2- (a) Validation of the simulated yield values against observed values ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); (b) Validation of the simulated biomass values against observed values ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول گردید. همچنین، پژوهش‌گران دیگری نیز بیان کردند که استفاده از مدل AquaCrop در مواقعی که با تیمارهای کم آبیاری چندروزه روبرو هستیم، به صحت پایین‌تر و خطای بالاتر مدل در شبیه‌سازی عملکرد منجر می‌شود (Alishiri et al., 2014; Martínez-Romero et al., 2021).

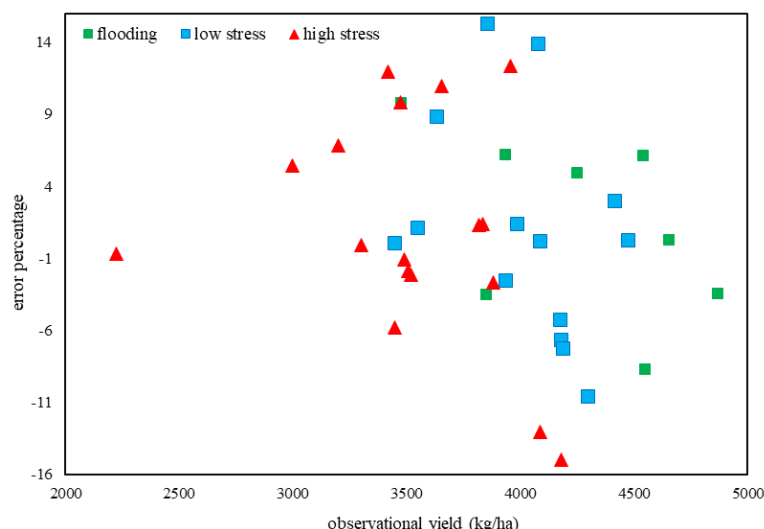
Roshani et al. (2021) بیان کردند که بیش‌ترین خطای نسبی در پیش‌بینی عملکرد دانه برنج در فاصله آبیاری ۱۱ روزه (بالاترین تنش آبی در نظر گرفته شده در پژوهش آن‌ها) رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد که ساختار مدل و فقدان روابط ریاضی مناسب در مدل AquaCrop و نیز لحاظ نکردن برخی از تغییرات ساختاری خود گیاه برنج در هنگام وقوع تنش آبی سبب شده تا صحت مدل در این شرایط نسبت به آبیاری غرقاب کاهش یابد که با یافته‌های Zeleke (2019) و Andarzian et al. (2011) همسو است.

نتایج تحلیل درصد خطای مدل در دو بخش واسنجی و اعتبارسنجی برای داده‌های شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در مقابل مقادیر مشاهداتی آن در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان پراکندگی خطای نسبی عملکرد در شرایط واسنجی نسبت به اعتبارسنجی بیش‌تر است. همچنین، میزان پراکندگی خطای نسبی عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop در تنش‌های آبی مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود دامنه تغییرات خطای مدل برای حالت بدون تنش از $-۸/۶۵$ تا $۹/۸۱$ درصد، برای حالت با تنش متوسط بین $-۱۰/۵۶$ تا $۱۵/۲۹$ درصد، و برای حالت با تنش زیاد از $-۱۵/۰۰$ تا $۱۲/۳۴$ درصد متغیر است. این بازه‌های خطا نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی از غرقاب دائم به تنش زیاد با افزودن دور آبیاری، میزان خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد افزایش می‌یابد. Stričević et al. (2023) بیان کردند که تنش آبی شدیدتر سبب اختلاف بین مقادیر



شکل ۳- درصد خطای نسبی برآورد مدل در دو بخش واسنجی و اعتبارسنجی در مقابل عملکرد مشاهداتی ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Figure 3- Percentage of relative error of model estimation in the two parts of calibration and validation versus observed performance (kg.ha^{-1})



شکل ۴- پراکندگی خطای نسبی (درصد) عملکرد شبیه سازی شده (kg.ha^{-1}) توسط مدل تحت تنش های آبی مختلف

Figure 4- Scattering of the relative error (%) of the yield simulated (kg.ha^{-1}) by the model under different water stress conditions

شود، از صحت مدل کاسته و بر خطای آن افزوده می شود. این مسئله به ساختار مدل و معادلات ریاضی مورد استفاده در آن و نیز صحت داده های اندازه گیری شده در مزرعه، نسبت داده شده است. اما با توجه به مزایای مدل AquaCrop نظیر نیاز به داده های کمتر، قابلیت استفاده برای طیف وسیعی از گیاهان زراعی و نیز کاربر دوست بودن مدل، استفاده از آن در مدیریت های مختلف آبیاری خصوصاً در شرایط بدون تنش آبی شدید که مدل از صحت بسیار خوبی برخوردار است، توصیه می شود.

سپاسگزاری

بر خود لازم می دانیم از حمایت معنوی مؤسسه تحقیقات برنج کشور قدردانی نمائیم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

حمید محمدی دهرایی: مفهوم سازی، انجام تحلیل های نرم افزاری/آمار، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ ابراهیم امیری:

با توجه به شکل ۴ آبیاری غرقاب و بدون تنش شرایط مناسبی را برای رشد برنج در تمامی فازهای رشدی فراهم می کند. در حالی که با آبیاری در فواصل زمانی مختلف، ویژگی های مربوط به عملکرد کاهش نسبی را از خود نشان می دهند. آبیاری غیرغرقاب و تنش آبی ناشی از آن سبب جلوگیری از انتقال مواد مغذی و کاهش فتوسنتز شده و به کاهش تعداد پنجه، سطح برگ، تجمع ماده خشک، تعداد دانه پر در خوشه، وزن صد دانه، زیست توده و در نهایت عملکرد دانه منجر می شود (Tarahomi et al., 2010). هرچند روش هایی نظیر آبیاری تناوبی در برنج که تنش چندان به گیاه وارد نمی کنند، در صورت اجرای صحیح می توانند عملکرد را نسبت به شرایط غرقاب، ثابت نگه داشت (Roderick et al., 2011). البته لازم به ذکر است که این مسئله در بین ارقام مختلف برنج متفاوت است. به عنوان مثال ارقام بومی و محلی ایران به شرایط غیرغرقابی مقاوم هستند (Rezaei et al., 2012).

۴- نتیجه گیری

مدل AquaCrop برای برنج رقم محلی هاشمی با استفاده از داده های مربوط به ۴۵ تیمار آبیاری در سال های مختلف واسنجی و اعتبارسنجی شد و مقادیر مربوط به عملکرد دانه و زیست توده برنج در دو حالت مشاهداتی و شبیه سازی شده با یکدیگر مقایسه شد و اثر تنش های آبی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به طور کلی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد دانه و زیست توده برنج رقم هاشمی دارای صحت خوبی است، اما هر چقدر میزان تنش آبی شدیدتر

رضایی، مجتبی (۱۴۰۲). گزارش نهایی طرح برآورد مطالعه بهره‌وری آب و مصرف نیتروژن در مدیریت‌های مختلف آبیاری در لاین‌های امیدبخش برنج. انتشارات موسسه تحقیقات برنج ایران، رشت.

رضایی، مجتبی، امیری، ابراهیم، و معتمد، محمدکریم (۱۳۹۰). اثر آبیاری تناوبی و مقادیر مختلف نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج رقم محلی هاشمی در گیلان. *زراعت (پژوهش و سازندگی)*، ۲۴(۴)، ۵۷-۶۷.

<https://www.magiran.com/p1028700>

رضایی، مجتبی، و نحوی، مجید. (۱۳۸۲). اثر دور آبیاری بر مقدار مصرف آب و عملکرد برنج در گیلان. مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۸۳-۲۳۳-۲۴۰.

علیزاده، مریم، میرزایی، فرهاد، و سهرابی، تیمور (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی تأثیر زئولیت بر رفتار خاک‌های شالیزاری منطقه گیلان در مراحل بروز ترک در حالت آبیاری تناوبی. *آب و خاک*، ۲۵(۵)، ۱۱۳۸-۱۱۴۶. doi: 10.22067/jsw.v0i0.11226

کوچکی، عوض، افشین، سلطانی، و مهدی، عزیزی (۱۳۹۲). *اکوفیزیولوژی گیاهی*. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۲۷۲ صفحه.

وزارت جهاد کشاورزی (۱۴۰۲). *آمارنامه کشاورزی* (جلد اول: محصولات زراعی). معاونت برنامه‌ریزی اقتصادی، مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات.

یزدانی، محمدرضا، اسعدی اسکویی، ابراهیم، رحمانی، اصغر، دواتگر، ناصر، و دلسوز خاکی، بهاره (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آب موردنیاز گلخانه‌ای در اراضی شالیزاری شبکه آبیاری سپیدرود با استفاده از اطلاعات رطوبت خاک ماهواره SMAP. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۷ (۳)، ۲۲۳-۲۴۳. doi: 10.22092/jwra.2023.360376.952

ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **مجتبی رضایی**: مشاوره، بازبینی متن مقاله؛ **جلال بهزادی**: بازبینی مقاله.

منابع

- ابراهیمی پاک، نیاز علی، اگدرنژاد، اصلان، تافته، آرش، و خدادادی دهکردی، داوود (۱۳۹۷). بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم‌آبیاری در دشت قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹(۵)، ۱۰۱۵-۱۰۰۳. doi: 10.22059/ijswr.2018.236158.667708
- امیری، ابراهیم، رضایی، مجتبی، و بنایان اول، محمد (۱۳۹۰). ارزیابی مدل رشد گیاهی برنج ORYZA2000 در شرایط محدودیت آبیاری و کود نیتروژن (واستجی و اعتباریابی). *آب و خاک*، ۲۵(۴)، ۷۵۷-۷۶۹. doi: 10.22067/jsw.v0i0.10206
- برزیکار، محمدعلی، اگدرنژاد، اصلان، تافته، آرش، و ابراهیمی پاک، نیازعلی (۱۳۹۹). شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندیجان با استفاده از مدل AquaCrop. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۱۷(۱)، ۵۳-۶۴. doi: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.6.3
- ترحمی، گلنار، لاهوتی، مهرداد، و عباسی، فروغ (۱۳۸۹). بررسی اثرات ناشی از تنش خشکی بر روی تغییرات قندهای محلول، میزان کلروفیل و پتاسیم در گیاه نوروک (*Salvia triifolia Benth*). *پلاسما و نشانه‌های زیستی*، ۳ (۲)، ۱-۷. <https://www.magiran.com/p867043>
- رضایی، مجتبی (۱۳۸۷). گزارش نهایی طرح بررسی اثر آبیاری تناوبی و مقادیر مختلف کود نیتروژن بر عملکرد برنج رقم محلی هاشمی. انتشارات موسسه تحقیقات برنج ایران، رشت.

References

- Ahmadi, S.H., Mosallaeepour, E., Kamgar-Haghighi, A.A., & Sepaskhah, A.R. (2015). Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resources Management*, 29, 2837-2853. doi: 10.1007/s11269-015-0973-3
- Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugarbeet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *International Journal of Biosciences*, 4, 1-9. doi: 10.12692/ijb/4.4.1-9
- Alizadeh, M., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2011). Laboratory study the effects of zeolite on Guilan province's paddy's soils behaviors in the occurrence of difference stages of the during cracks intermittent irrigation. *Water and Soil*, 25(5), 1138-1146. doi: 10.22067/jsw.v0i0.11226 [In Persian]
- Amiri, E., Rezaei, M., & Bannayan Awal, M. (2011). Evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen and water limited conditions (calibration and validation). *Water and Soil*, 25(4), 757-769. doi: 10.22067/jsw.v0i0.10206 [In Persian]
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. doi: 10.1016/j.agwat.2011.08.023
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., & Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846. doi: 10.1016/j.agwat.2010.06.021
- Arivelarasan, T., Manivasagam, V.S., Geethalakshmi, V., Bhuvaneswari, K., Natarajan, K., Balasubramanian, M., Gowtham, R., & Muthurajan, R. (2023). How far will climate change affect future food security? An inquiry into the irrigated rice system of

- Peninsular India. *Agriculture*. 13(3): 551. doi: 10.3390/agriculture13030551
- Bandumula, N. (2018). Rice production in Asia: Key to global food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88, 1323-1328. doi: 10.1007/s40011-017-0867-7
- Barzikar, M.A., Egdernezhad, A., Taftah, A., & Ebrahimipak, N.A. (2020). Wheat yield and water productivity simulation in Hendijan plain using AquaCrop model. *Water Management in Agriculture*, 7(1), 53-64. doi: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.6.3 [In Persian]
- Battisti, R., Sentelhas, P.C., & Boote, K.J. (2017). Inter-comparison of performance of soybean crop simulation model and their ensemble in southern Brazil. *Field Crop Research*, 200, 28–37. doi: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.6.3
- Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., ten Berge, H.F.M., & van Laar, H.H. (2001). *ORYZA2000: Modeling Lowland Rice*. Los Banos, Philippines, 235 pages.
- Cusicanqui, J., Dillen, K., Geerts, S., Raes, D., Mathijs, E., & García, M. (2013). Economic assessment at farm level of the implementation of deficit irrigation for quinoa production in the Southern Bolivian Altiplano. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(4), 894-907. doi: 10.5424/sjar/20131114-4097
- de Roos, S., De Lannoy, G.J., & Raes, D. (2021). Performance analysis of regional AquaCrop (v6.1) biomass and surface soil moisture simulations using satellite and in situ observations. *Geoscientific Model Development*, 14(12), 7309-7328. doi: 10.5194/gmd-14-7309-2021
- Dehghan Moroozeh, A., Farhadi Bansouleh, B., Ghobadi, M., & Ahmadpour, A. (2023). Assessment of DSSAT and AquaCrop models to simulate soybean and maize yield under water stress conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 21(3), e1201. doi: 10.5424/sjar/2023213-19918
- Dercas, N., Dalezios, N.R., Stamatiadis, S., Evangelou, E., Glampedakis, A., Mantonakis, G., & Tserlikakis, N. (2022). AquaCrop simulation of winter wheat under different N. management practices. *Hydrology*, 9(4), 56. doi: 10.3390/hydrology9040056
- Dias, M., Navaratne, C., Weerasinghe, K., & Hettiarachchib, R. (2016). Application of DSSAT crop simulation model to identify the changes of rice growth and yield in Nilwala river basin for mid-centuries under changing climatic conditions. *Procedia Food Science*, 6, 159–163. doi: 10.1016/j.profoo.2016.02.039
- Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*, 33, 257. doi: 10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2
- Du, W., Xuechao, H., Shamaila, Z. & Hu, Z. (2011). Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 42, 174–178.
- Ebrahimi Pak, N., Egder Nejad, A., Taftah, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2018). Evaluation of AquaCrop model to simulate canola (*Brassica napus*) yield under deficit irrigation scenarios in Ghazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(5), 1003-1015. doi: 10.22059/ijswr.2018.236158.667708 [In Persian]
- Elsadek, E., Zhang, K., Mousa, A., Ezaz, G.T., Tola, T.L., Shaghaleh, H., & Alhaj Hamoud, Y. (2023). Study on the in-field water balance of direct-seeded rice with various irrigation regimes under arid climatic conditions in egypt using the AquaCrop model. *Agronomy*, 13(2), 609. doi: 10.3390/agronomy13020609
- FAO. (2020). Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: http://www.fao.org/index_en.htm/, 1/1/2020)
- FAO. (2023). Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: http://www.fao.org/index_en.html/, 15/11/2023)
- Farahani, H.J., Izzi, G., & Oweis, T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101(3), 469-476. doi: 10.2134/agronj2008.0182s
- Gurgel, A.C., Reilly, J. & Blanc, E. (2021). Challenges in simulating economic effects of climate change on global agricultural markets. *Climate Change*. 166, 29. doi: 10.1007/s10584-021-03119-8
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficit field maize. *Agronomy Journal*. 101, 488–498. doi: 10.2134/agronj2008.0029xs
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459. doi: 10.2134/agronj2008.0218s
- Hussein, F., Janat, M., & Yakoub, A. (2011). Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1319-1330. doi: 10.5424/sjar/20110904-358-10
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pie, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & Rio, S.D. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under

- deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135, 61–72. doi: 10.1016/j.agwat.2013.12.012
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, N., Nawaz, A., & Anjum, S. A. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, 106363. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106363
- Jin, L., Wei, D., & Yin, D. (2023). Research progress on greenhouse microclimate simulation and greenhouse crop growth modeling. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 43, 55–64. doi: 10.1016/j.compag.2019.04.013
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G., & Wang, J. (2018). A review of data assimilation of remote sensing and crop models. *European Journal of Agronomy*, 92, 141–152. doi: 10.1016/j.eja.2017.11.002
- Jorge, A., Coulibaly, S., Baki, G., Camacho, J.L., Dao, A., Migraine, J.B. & Marta, A.D. (2023). Using AquaCrop as a decision-support tool for improved irrigation management in the Sahel region. *Agricultural Water Management*, 287, 108430. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108430
- Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.005
- Koochaki, A., Soltani, A., Azizi, M. (2013). *Plant ecophysiology*. Academic Jihad Publications: Mashhad. 272 pages. [In Persian]
- Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M., (2023). 25 Countries, Housing one-quarter of the population, face extremely high-water stress. World Resources Institute. (sited in: <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>)
- Li, F., Yu, D., & Zhao Y. (2019). Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop model. *Water Resources Management*, 33, 39–55. doi: 10.1007/s11269-018-2087-1
- Maniruzzaman, M., Talukder, M.S.U., Khan, M.H., Biswas, J.C., & Nemes, A. (2015). Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 159, 331–340. doi: 10.1016/j.agwat.2015.06.022
- Margarita, G.V., & Elías, F. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36, 21–31. doi: 10.1016/j.eja.2011.08.003
- Martínez-Romero, A., López-Urrea, R., Montoya, F., Pardo, J.J., & Domínguez, A. (2021). Optimization of irrigation scheduling for barley crop, combining AquaCrop and MOPECO models to simulate various water-deficit regimes. *Agricultural Water Management*, 258, 107219. doi: 10.1016/j.agwat.2021.107219
- Matthews, R.B., Rivington, M., Muhammed, S., Newton, A.C., & Hallett, P.D. (2013). Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. *Global Food Security*, 2(1), 24–28. doi: 10.1016/j.gfs.2012.11.009
- Mbangiwa, N.C., Savage, M.J., & Mabhaudhi, T. (2019). Modelling and measurement of water productivity and total evaporation in a dryland soybean crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266–267, 65–72. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.12.005
- Mibulo, T., & Kiggundu, N. (2018). Evaluation of FAO AquaCrop model for simulating rainfed maize growth and yields in Uganda. *Agronomy*, 8, 238. doi: 10.3390/agronomy8110238
- Ministry of Agriculture Jihad. (2023). *Agricultural Statistics (Volume 1: Crops)*. Economic planning deputy, statistics center, information and communication technology. [In Persian]
- Mondal, M.S., Saleh, A.F.M., Akanda, M.A.R., Biswas, S.K., Moslehuddin, A.Z.M., Zaman, S., ... & Clarke, D. (2015). Simulating yield response of rice to salinity stress with the AquaCrop model. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 17(6), 1118–1126. doi: 10.1039/C5EM00095E
- Mostafa, M., Luo, W., Zou, J., & Salem, A. (2023). Optimizing rice irrigation strategies to maximize water productivity: A simulation study using AquaCrop model for the Yanyun irrigation district, Yangzhou, China. *Earth*, 4(3), 445–460. doi: 10.3390/earth4030024
- Nikolaus, B. (2013). Rice production in Africa: simulation of rice production and water productivity using AquaCrop in an inland valley in Central Benin. Master's thesis, Department of Hydrology and Water Resources Management, Kiel University, Germany.
- Paredes, P., de Melo-Abreu, J.P., Alves, I., & Pereira, L.S. (2014). Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*, 144, 81–97. doi: 10.1016/j.agwat.2014.06.002
- Puma-Cahua, J., Belizario, G., Laqui, W., Alfaro, R., Huaquisto, E., & Calizaya, E. (2023).

- Evaluating the yields of the rainfed potato crop under climate change scenarios using the AquaCrop model in the Peruvian Altiplano. *Sustainability*, 16(1), 71. doi: 10.3390/su16010071
- Raes, D., (2002). BUDGET, A soil water and salt balance model. Reference Manual. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences Institute for Land and Water Management. Belgium.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101, 438-447. doi: 10.2134/agronj2008.0140s
- Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., & Zhang, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203, 438-450. doi: 10.1016/j.agwat.2018.01.030
- Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M. N., & Plauborg, F. (2017). Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 191, 113-123. doi: 10.1016/j.agwat.2017.06.008
- Rezaei, M., & Nahvi, M. (2003). Effect of different irrigation intervals on water use efficiency and yield of rice in Guilan. Proceeding of 11th Conference of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Tehran, Iran, p. 674. [In Persian]
- Rezaei, M. (2008). The final report of the research project on the effect of intermittent irrigation and different amounts of nitrogen fertilizer on the yield of Hashemi local variety rice. Publications of Rice Research Institute of Iran, Rasht. [In Persian]
- Rezaei, M. (2023). The final report of the research project on the study and comparison of water productivity and nitrogen application in different irrigation management of some rice promising lines. Publications of Rice Research Institute of Iran, Rasht. [In Persian]
- Rezaei, M., Amiri, E., & Motamed, M.K. (2012). Effects of irrigation interval and nitrogen fertilizer on yield and water productivity of rice (Hashemi cultivar) in Guilan. *Agronomy Journal (Pajhouhesh & Sazandegi)*, 24 (4): 57-67. <https://www.magiran.com/p1028700> [In Persian]
- Richards, M., & Ole, B. (2014). Alternate wetting and drying in irrigated rice. IRRI CCAFS and Info Notes. (sited in: http://www.agritech.tnau.ac.in/agriculture/pdf/csa_pdf/Alternate_wetting_and_drying_in_irrigated_rice_InfoNote.pdf)
- Rinaldi, M., Losavio, N., & Flagella, Z. (2003). Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78(1), 17-30. doi: 10.1016/S0308-521x(03)00030-1
- Roderick, M., Florencia, G.R., Rodriguez, G.D.P., Lampayan, R.M., & Bouman, B.A.M. (2011). Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. *Food Policy*. 36(2): 280-288. doi: 10.1016/j.foodpol.2010.11.026
- Roshani, S., Mohassel, M.H., Haghighi, R.S., & Amiri, E. (2021). The Assessment of AquaCrop model in predicting rice genotypes grain and biological yield under water management conditions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(3), 2283-2291. doi: 10.15244/pjoes/125940
- Saadati, Z., Pirmoradian, N. & Rezaei, M. (2011). Calibration and validation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage, Tehran, Iran.
- Sandhu, R., & Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*. 223, 105687. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105687
- Shrestha, N., Raes, D., Vanuytrecht, E., Sah, S.K., & (2013). Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. *Agricultural Water Management*. 122, 53-62. doi: 10.1016/j.agwat.2013.03.003
- Smith, M. (1992). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*. Food & Agriculture Organization, 127 pages.
- Steduto, P., Hsiao, T.C, Raes, D., & Fereres, E. (2009) AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water. water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101: 426-437. doi: 10.2134/agronj2008.0139s
- Stricevic, R., Cosic, M., Djurovic, N., Pejic, B., & Maksimovic, L., (2011). Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98, 1615-1621. doi: 10.1016/j.agwat.2011.05.011
- Stričević, R., Lipovac, A., Djurović, N., Sotonica, D., & Čosić, M. (2023). AquaCrop model performance in yield, biomass, and water requirement simulations of common bean grown under different irrigation treatments and sowing periods. *Journal of Horticultural Sciences*, 9(4), 507. doi: 10.3390/horticulturae9040507

- Takács, S., Csengeri, E., Pék, Z., Bíró, T., Szuvandzsiev, P., Palotás, G., & Helyes, L. (2021). Performance evaluation of AquaCrop model in processing tomato biomass, fruit yield and water stress indicator modelling. *Water*, 13(24), 3587. doi: 10.3390/w13243587
- Tarahomi, G., Lahuti, M., & Abasi, F. (2010). Effects of drought stress on changes in soluble carbohydrates, chlorophyll and potassium in (*Salvia leriifolia* Benth). *Journal of Plasma & Biomarkers*, 3(2), 1-7. <https://www.magiran.com/p867043> [In Persian]
- Van Diepen, C.V., Wolf, J.V., Van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: A simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5(1), 16-24. doi: 10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x
- Wang, S., Wang, D., Liu, T., Liu, Y., Luo, M., Li, Y., & Li, K. (2024). Simulation of winter wheat growth dynamics and optimization of water and nitrogen application systems based on the AquaCrop model. *Agronomy*, 14(1), 110. doi: 10.3390/agronomy14010110
- Yazdani, M.R., Asadi Oskoue, E., Rahmani, A., Davatgar, N., & Delsouz Khak, B. (2023). Analysis of temporal and spatial variations of water requirement for puddling in paddy fields of Sepidrood irrigation network using SMAP satellite soil moisture information. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences)*, 37(3): 223-243. doi: 10.22092/jwra.2023.360376.952 [In Persian]
- Zelege, K.T. (2019). AquaCrop calibration and validation for faba bean (*Vicia faba* L.) under different agronomic managements. *Agronomy*, 9(6), 320. doi: 10.3390/agronomy9060320
- Zhai, B., Fu, Q., Li, T., Liu, D., Ji, Y., Li, M., & Cui, S. (2019). Rice irrigation schedule optimization based on the AquaCrop model: study of the Longtougiao irrigation district. *Water*, 11(9), 1799. doi: 10.3390/w11091799
- Zhou, D., Wang, H., Wang, X., Wang, F., Zhang, J., & Ma, D. (2024). Evaluation of AquaCrop's ability to simulate water stress based on 2-year case study of maize crop. *Agronomy*, 14(2), 354. doi: 10.3390/agronomy14020354